

# 修士論文概要書

Summary of Master's Thesis

Date of submission: 2 / 1 / 2013 (MM/DD/YYYY)

専攻名（専攻分野） Department	情報理工学	氏名 Name	徐 曉雋	指 導 教 員 Advisor	上田 和紀	印 Seal
研究指導名 Research guidance	並列知識情報処理	学籍番号 Student ID number	CD 5111B052 - 8			
研究題目 Title	Literal Block Distance に基づく学習節の共有を行う並列 SAT ソルバ Glucans					

## 1 概要

SAT (充足可能性問題) とは、ある命題論理式に対して解となる変数の割当てを示す (SAT) か、解が存在しないことを示す (UNSAT) 問題である。SAT を解く SAT ソルバの高速化によって、近年ソフトウェア検証などの実問題を解くエンジンとして利用されている。その中でも、最も高速な SAT ソルバとして学習節の共有を行うさまざまな並列ソルバが研究されてきた。逐次のものも含めて多くの SAT ソルバで学習節の管理は共通の課題だが、特に並列 SAT ソルバではその量が増え、効果的な学習節を保持しそれ以外を削除することが難しくなる。本研究では、最も高速な SAT ソルバを作ることを目的に、長期的な学習節の有用性を表す尺度である Literal Block Distance(LBD) に基づいて学習節の共有を行う並列 SAT ソルバ Glucans を作成し、その評価を行った。さらに 2012 年の競技会である SAT Challenge 2012 [6] に参加した。

## 2 SAT 問題

SAT 問題は命題論理式の充足可能性を探索するものであり、2 値の変数の正負の出現を表すリテラル、リテラルの論理和である節、節の論理積からなる乗法標準形 (CNF) の論理式で構成される。

### 2.1 SAT の探索アルゴリズム

昨今の SAT 競技会においては、大多数のソルバが変数選択、推論、衝突解析、バックトラックの 4 つのフェイズを繰り返しながら解を探索する CDCL アルゴリズムを採用している。SAT の探索空間は巨大で様ではないが、衝突解析フェイズで得られる学習節により剪定が可能である。

### 2.2 学習節の管理

CDCL を用いた SAT ソルバの探索時間は、その 8 割を推論フェーズが占める [7] ため、多くの SAT ソルバでは有用な学習節だけで推論を行う事で高速を図っているため、探索途中で時々一定の尺度に基づいて学習節の削除を行う。

#### 2.2.1 Literals Blocks Distance

Literals Blocks Distance (LBD) は、実問題からエンコードされた SAT 問題においてしばしば関連性のある変数群が存在することを利用した学習節の評価尺度であり、次の定義 2.1 のように定義される。

**定義 2.1 (LBD (Literal Block Distance))** [1] ある節  $C$  が与えられたときに、節  $C$  中に含まれるすべてのリテラルを、その現在の割当の決定レベルが同じものを 1 ブロックとして、 $n$  個のブロックに分割できる。この時、節  $C$  の LBD は  $n$  とする。

LBD は、現在の探索域によらない問題全体に対して有効な尺度である。特に LBD の値が 2 であるものが推論フェーズで有用な学習節と考えらる。

## 3 並列 SAT ソルバ Glucans

並列 SAT ソルバは逐次 SAT ソルバをベースに Pthreads でマルチスレッド化を行い、各スレッドに学習節の共有機能を実装する事によって作成した。

### 3.1 ベースソルバの選定

本研究で作成した並列 SAT ソルバ Glucans は、作成時点で SAT Competition 2011 で充足可能な問題と充足不可能な問題の分野でそれぞれ優勝と準優勝した SAT ソルバを基にしている。これらは、代表的な SAT ソルバである MiniSat [7] を拡張したものであり、特に、SAT ソルバ Glucose [3] をベースに作成した。Glucose や GLUEMINISAT [5] は LBD に基づいて学習節を管理する逐次 SAT ソルバであり、本研究の LBD に基づく学習節共有による並列化と親和性が高い。また、Glucans では、同じ MiniSat を拡張した SAT ソルバである Contrasat [4]、CIRMiniSat の機能も組み込んだ。これらの SAT ソルバは充足可能な問題で高速であるという特長がある。

表 1 SAT Competition 2011 の結果

	Gold	Silver	Bronze
ALL	Glucose2.0	GLUEMINISAT	Lingeling
SAT	Contrasat	CIRMiniSat	mphasesat64
UNSAT	GLUEMINISAT	Glucose2.0	QuteRSat

### 3.2 学習節の共有と管理

LBD が小さい学習節は有用と考えられるので、Glucans の各スレッドでは LBD が 5 以下の学習節が生成される度に、他のスレッドそれぞれが持つ FIFO キューの要素としてその学習節のコピーを追加していく。学習節を共有した場合に有用な節でも、自スレッドの探索空間と直接関係のないものが存在する可能性があるため、定期的に行う学習節の削除では、LBD=2 のものだけを保持し、その他は直近の使用頻度に基づいて削除するようにした。

### 3.3 関連研究

PeneLoPe[2] は本研究の Glucans とほぼ同時期に開発され、同様に LBD に基づいた学習節の共有を行う並列 SAT ソルバである。本研究の新規性は特に、学習節の保有戦略が異なる点にある。PeneLoPe では学習節を完全に LBD のみによって評価するが、SAT Challenge 2012 に出場した Glucans では LBD が 2 以上のものはその使用頻度の少ないものから削除する Activity 版。また比較のためすべて LBD 順に評価する Basic 版を作成した。更に、異なる共有タイミングを有する推論中の LBD 更新で LBD が 2 となった学習節も共有する Strict 版も作成した。

## 4 評価実験

作成した Glucans を SAT 問題に対する解の探索時間について、SAT Challenge 2012(600 題)への参加による競技会の結果と、2010 年から 2012 年までの競技会の問題すべて(800 題)を使用した評価をローカル環境で行った。

### 4.1 実験環境

ローカル環境での評価は、OS が CentOS 6.3 (kernel 2.6.32)、CPU が 2x Eight-Core Intel Xeon E5-2660 2.20GHz、メモリ容量が 32GB のサーバー上で gcc 4.4.6 でコンパイルしたバイナリを使用して行った。

### 4.2 SAT Challenge 2012 の結果

SAT Challenge 2012 の制限時間 900 秒以内で解けた問題数を競うルールで、Parallel Track: Application SAT+UNSAT に投稿した Glucans はの最終的な結果は、全 600 題中 521 題解き 4 位であったが、1 位の pfolioUZK との差は 10 問であった。すべての問題それぞれについて最も速く解けたソルバを集計した場合には 179 題(全問題の約 30%)の問題で最も高速に求解可能で、2 番目の SAT ソルバ PeneLoPe の 78 題の 2 倍以上多いという特長がある。

### 4.3 実験結果

実験結果を図 1 に載せる。横軸が解けた問題数で、その探索時間について昇順にならべ、縦軸が探索時間となっている。なお、横軸について Glucose2.0 が 200 秒かかる問題を最小値として拡大している。短時間で解ける問題数については各ソルバ共に有為な差がないものの、Glucans と

PeneLoPe と比較した場合には、特に長時間必要な難しい問題において、Glucans の方が高速である事が分かる。

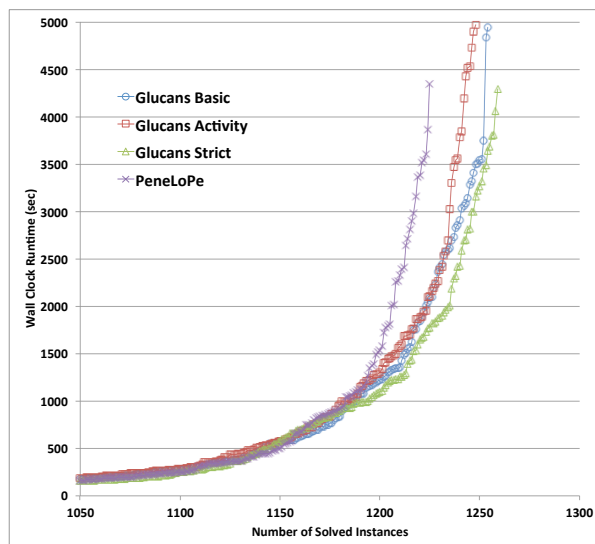


図 1 各ソルバの実行時間 (Cactus Plot)

## 5 まとめと今後の課題

本研究の Glucans では、推論フェーズでの学習節の共有する Strict 版が最も高速で、前年の競技会で優勝した並列 SAT ソルバ Plingeling と比べても非常に高速であっただけでなく、ほぼ同時期に研究されていた PeneLoPe よりも特に大規模な問題において高速であることが分かった。Glucans では学習節の共有を LBD が 5 以下の学習節に制限しているが、この値について最適値の算出や動的な調整方法について今後検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] Gilles Audemard, Laurent Simon: Predicting Learnt Clauses Quality in Modern SAT Solver, In Twenty-first International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 399-404, 2009.
- [2] Gilles Audemard, Benoît Hoessen, Saïd Jabbour, Jean-Marie Lagniez and Cédric Piette: Revisiting Clause Exchange in Parallel SAT Solving, In Fifteenth International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing, pp. 200-213, 2012.
- [3] Gilles Audemard and Laurent Simon: GLUCOSE: a solver that predicts learnt clauses quality, SAT Competition 2009 Solver Description, <http://www.cril.univ-artois.fr/SAT09/solvers/booklet.pdf>, 2009
- [4] Allen Van Gelder: Contrasat - A Contrarian Sat Solver, Extended System Description, Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation 8, pp. 117-122, 2012.
- [5] 鍋島英知, 岩沼宏治, 井上克巳: GlueMiniSat 2.2.5: 単位伝播を促す学習節の積極的獲得戦略に基づく高速 SAT ソルバー, 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会, 6E-1, 2011-9-29.
- [6] Xiaojuan Xu, Yuichi Shimizu, Kazunori Ueda: Glucans System Description, in Proceedings of SAT Challenge 2012: Solver and Benchmark Descriptions, pp. 23-24, Department of Computer Science Series of Publications B, vol.B-2012-2, University of Helsinki, Helsinki.
- [7] Niklas Een, Niklas Sörensson: An Extensible SAT-solver, Theory and Applications of Satisfiability Testing Lecture Notes in Computer Science, Volume 2919, pp. 502-518, 2004